

Karel VOJTASÍK¹, Eva HRUBEŠOVÁ², Marek MOHYLA³

**DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKA OSTĚNÍ ZE STŘÍKANÉHO BETONU A OCELOVÝCH
PŘÍHRADOVÝCH NOSNÍKŮ**

WORK DIAGRAM OF THE SHOTCRETE LINING AND LATTICE PROFILES

Abstrakt

Ocelobetonové tunelové ostění je jediným typem stabilizační konstrukce, která je staticky činná již ve fázi její výstavby, která následuje bezprostředně po provedení výrubu. Tato okolnost ji předurčuje k stabilizaci výrubu v součinnosti s horninovým masivem. Deformační charakteristiku ocelobetonového ostění určuje proměnlivá tuhost průřezu ostění během výstavby a krátce po jeho dokončení a je dána procesem výstavby ostění. Proměnlivá tuhost konstrukce ostění umožňuje řízené uvolnění napětíového stavu horninového masivu po provedení výrubu. Předložený článek analyzuje činnost tunelového ostění ze stříkaného betonu a ocelových příhradových nosníků. Deformační charakteristika je stanovena na základě vzájemné interakce mezi ostěním a horninovým prostředím v průběhu konstrukčních etap budování ostění, které jsou určeny geometrickými parametry průřezu ostění a stavem tvrdnutí jednotlivých vrstev stříkaného betonu.

Klíčová slova

Deformační charakteristika, tunelové ostění, stříkaný beton, příhradový nosník.

Abstract

Shotcrete steel tunnel lining is the only type of support structure competent to carry load in the phase of construction, which follows immediately after an opening excavation. This feature makes it suitable for stabilizing excavation in corporate work with the rock mass. Work diagram of the shotcrete steel lining is determined by stiffness variation of the lining cross section during construction and shortly after completion, which is given by the construction process of the lining. The variable stiffness of the lining allows for controlled release of the rock mass stress state around the excavation. The article on display analyzes the performance of a tunnel lining built of shotcrete and lattice profiles. The work diagram is drawn from the corporate work of the lining and rock ground during the all lining construction phases, which are conditioned with the lining cross-sectional geometric parameters and the hardening development of lining shotcrete shells.

Keywords

Work diagram, tunnel lining, shotcrete, lattice profile.

¹ Doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Poděště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 947, e-mail: karel.vojtasik@vsb.cz.

² Doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Poděště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 973, e-mail: eva.hrubesova@vsb.cz.

³ Ing. Marek Mohyla, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Poděště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 362, e-mail: marek.mohyla.stl@vsb.cz.

1 ÚVOD

Deformační charakteristika ocelobetonového ostění ze stříkaného betonu a ocelových příhradových nosníků se odlišuje od ostatních typů podpěrných ostění okolnostmi, které plynou ze způsobu provádění konstrukce průřezu ocelobetonového ostění. Tvar průřezu a materiálové parametry konstrukcí běžných typů podpěrných ostění jsou neměnné, tuhost konstrukce ostění je konstantní a ostění je staticky činné teprve až od okamžiku jeho vybudování. Dále zde existuje značná časová prodleva mezi okamžikem provedení výrubu a aktivním statickou činností ostění. Slabinou podpěrných ostění je vazba na jejich rozhraní s horninovým prostředím. Stabilizační konstrukce ze stříkaného betonu uvedená omezení buď zcela eliminují, např. problém vazby na rozhraní s horninovým prostředím, nebo minimalizují, jako je tomu u časové prodlevy mezi provedením výrubu a počátkem stabilizace horninového prostředí. Rozhodujícím rysem, kterým se ocelobetonové ostění odlišuje a činí z něho výjimečnou stabilizační konstrukci, je jeho proměnlivá rostoucí tuhost závislá na čase. Proměnlivost tuhosti průřezu je dána dvěma okolnostmi. První okolností, která plyne z procesu výstavby ostění, je postupná změna geometrie průřezu. Ten je složen zpravidla dvou ze vrstev stříkaného betonu, jejichž nástřik následuje s časovým odstupem několika hodin nebo dnů. Druhou okolností je časová závislost tvrdnutí stříkaného betonu ve vrstvách. Stabilizační činnost ocelobetonového ostění dotváří podpěrná oblouková konstrukce z příhradových prutů, která dává ostění okamžitou únosnost a která je stříkaným betonem dokonale integrována s horninovým prostředím. Uvedené skutečnosti, okamžitá stabilizační reakce, bezprostřední vazba s horninovým prostředím a rostoucí tuhost průřezu ostění, předurčují konstrukci ocelobetonového ostění k řízenému uvolnění horninového napětového stavu po provedení výrubu a řízené zatěžování ostění horninovým prostředím.

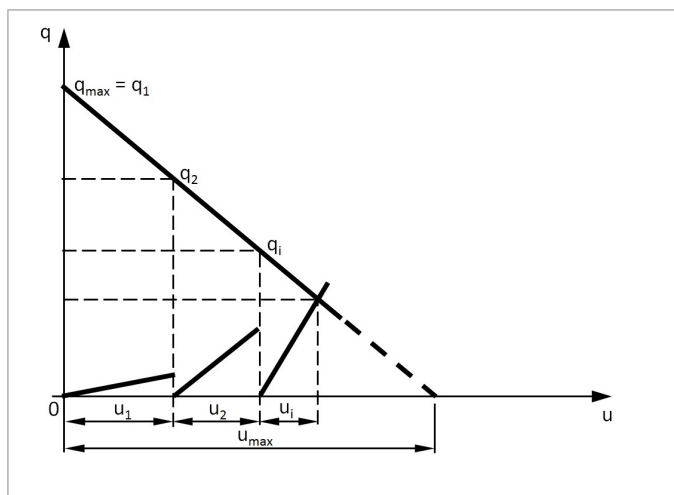
2 PODMÍNKY STANOVENÍ DEFORMAČNÍ CHARAKTERISTIKY

Deformační charakteristika ocelobetonového ostění je stanovena pro následující předpoklady:

- součinnost s horninovým prostředím (Hilar, 2008),
- proměnlivá tuhost ostění (Vojtasík, Hrubešová, Mohyla, Staňková, 2011),
- hodnota modulu pružnosti ocelobetonového průřezu je vypočtena analytickou metodou (Vojtasík, Hrubešová, Mohyla, Staňková, 2010), která je založena na analytickém modelu výpočtu napěťo-deformačního stavu ve vícevrstevném kruhovém prstenci (Bulytchev, 1982). Vnější zatížení prstence se přerozděluje na jednotlivé vrstvy přenosovými koeficienty, které jsou odvozeny z podmínky spojitosti deformací na jednotlivých kontaktech vrstev,
- lineární deformační charakteristika horninového prostředí; horninové prostředí reprezentuje bod, který je umístěn na rozhraní horninové prostředí – vnější líc ostění ve vrcholu klenby výrubu; okrajové podmínky deformační charakteristiky v bodě jsou: $[q_{max}, u = 0]$ a $[q = 0, u_{max}]$; q – stav napjatosti horninového prostředí, u – posun bodu; u_{max} – maximální posun bodu, pro který je zachována stabilita výrubu a horninové prostředí zůstává neporušeno,
- činnost ocelobetonového ostění je rozložena do tří deformačních etap: postavení ocelového příhradového oblouku a nástřik první vrstvy betonu; nástřik druhé vrstvy betonu; ukončení procesu tvrdnutí v obou vrstvách betonu. Každé deformační etapě přísluší individuální modul pružnosti ocelobetonového ostění (E_{bet-}),
- ocelobetonové ostění je činné ihned po provedení výrubu, počáteční deformace na nevyztuženém výrubu je rovna nule,
- posun (u) (napjatost v konstrukci ocelobetonového ostění (q_{OCB})) bodu ostění v jeho dílčí konstrukční (tuhostní, časové) etapě je stanovena výpočtem ze stavu napjatosti (q) v horninovém prostředí, který přísluší k této etapě,
- stav napjatosti (q) pro aktuální konstrukční etapu ostění je funkcí realizovaného posunu, tj. součtu posunů všech předchozích etap; napjatost horninového prostředí je postupně

snížována (redukována); velikost snížení (redukce) stavu napjatosti je stanovena z hodnoty realizovaného posunu a jí příslušné hodnoty napjatosti na deformační charakteristice horninového prostředí (obr. 1),

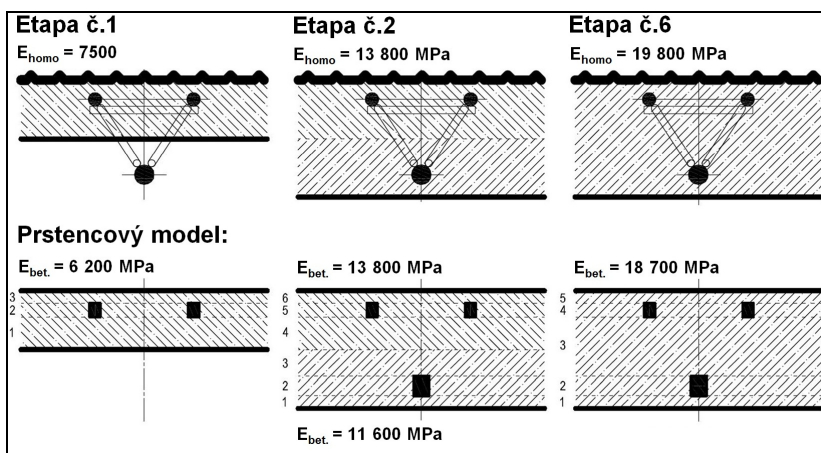
- napjatost v konstrukci ocelobetonového ostění (q_{OCB}) je dána superpozicí dílčích napjatostí.



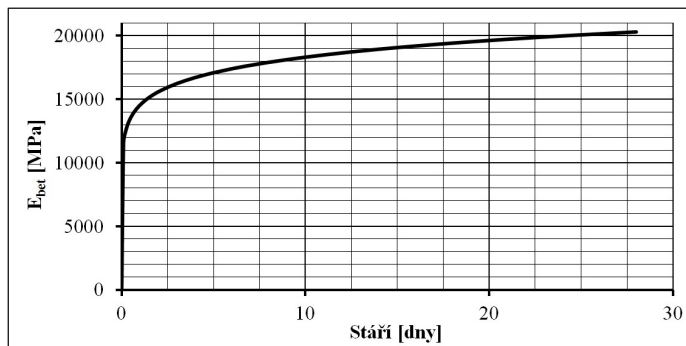
Obr. 1: Postup při stanovení stavu napjatosti (q_i) pro jednotlivé etapy činnosti ocelobetonového ostění

3 PŘÍKLAD

Schéma příkladu konstrukce průřezu ocelobetonového ostění je na obrázku č. 2. Ostění tvoří ocelový příhradový nosník typ ASTA 98 a dvě vrstvy stříkaného betonu. První vrstva stříkaného betonu je aplikována okamžitě po provedení výrubu. Druhá vrstva stříkaného betonu je aplikována po 12-ti hodinách od nástřiku první vrstvy. Obě vrstvy mají stejnou tloušťku, která činí 0,14 m. Graf na obrázku č. 3 uvádí časovou závislost nárůstu modulu pružnosti stříkaného betonu (E_{bet}) v čase.



Obr. 2: Schéma konstrukčních etap ocelobetonového ostění



Obr. 3: Vývoj hodnoty modulu pružnosti stříkaného betonu (E_{bet}) v čase

Hodnoty modulu pružnosti ocelobetonového průřezu (E_{homo}) pro konstrukční etapy výstavby ocelobetonového ostění uvádí tabulka č. 1.

Tab. 1: Hodnoty modulu pružnosti ocelobetonového průřezu (E_{homo}) v čase

Eta	Stáří [jednotka]		Vrstva	E_{bet} [MPa]	E_{homo} [MPa]
1	0,5	[hod.]	vrstva 1	6200	7500
2	14,0		vrstva 1	13800	13800
	2,0		vrstva 2	11600	
3	36,0		vrstva 1	15200	16000
	24,0		vrstva 2	14600	
4	3,5	[dny]	vrstva 1	16500	17500
	3		vrstva 2	16200	
5	6,5		vrstva 1	17500	18500
	6		vrstva 2	17400	
6	12,5		vrstva 1	18700	19800
	12		vrstva 2	18700	
7	28,5		vrstva 1	20300	21400
	28		vrstva 2	20300	

Ke stanovení deformační charakteristiky ocelobetonové výztuže je užit matematický 2D MKP model geotechnické situace s kruhovým výrubem. Matematický model charakterizují následující parametry:

Konstitutivní vztah Mohr-Coulomb ($c = 40$ kPa; $\varphi = 17^\circ$); homogenní izotropní prostředí ($\gamma = 25,0$ kNm⁻³, $E_{hor} = 30000$ kPa; $\nu = 0,35$); primární napjatost ($q_{max} = 629$ kPa, $q_{max} \approx q_1$). K řešení byl užit výpočetní program PLAXIS.

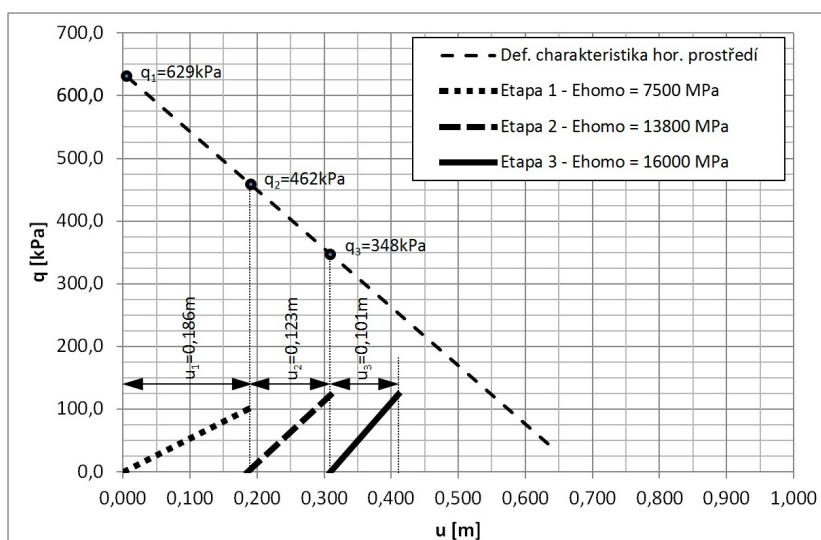
4 VÝSLEDKY

Výsledky řešení příkladu jsou shrnuty v grafech na obrázcích č. 5 a č. 6.

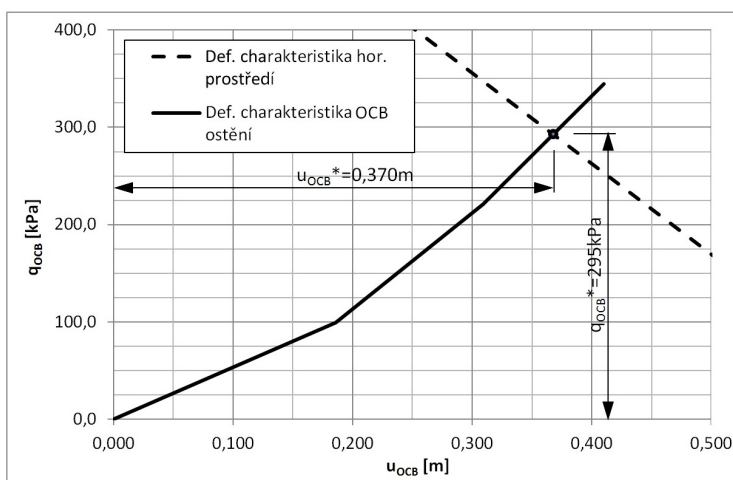
Grafy na obrázku č. 5 dokumentují: vývoj uvolňování primární napjatosti horninového masivu během jeho stabilizace ocelobetonovým ostěním; průběh dílčí posunů (u_i) pro jednotlivé konstrukční etapy (č. 1–3) ocelobetonového ostění. Z grafu jsou odečteny hodnoty stavu napjatosti horninového masivu (q_i) pro jednotlivé konstrukční etapy ocelobetonového ostění. Každou etapu charakterizuje hodnota modulu pružnosti ocelobetonového ostění (E_{homo}).

Graf na obrázku č. 6 uvádí deformační charakteristiku odvozenou za okolností součinnosti ostění s horninovým prostředím. Graf dokumentuje závislost napětí v průřezu konstrukce ostění (q_{OCB}) na posunu (u_{OCB}) bodu, který je umístěn ve vrcholu klenby výrubu na rozhraní mezi horninovým prostředím a vnějším pláštěm ostění. Z grafu jsou stanoveny konečné hodnoty napětí

v průřezu konstrukce ostění (q_{OCB}^*) a posun bodu (u_{OCB}^*) při dosažení stavu stabilizace horninového prostředí.



Obr. 5: Vývoj uvolňování primární napjatosti horninového masivu a stanovení hodnot stavu napjatosti horninového masivu (q_i) pro jednotlivé konstrukční etapy ocelobetonového ostění



Obr. 6: Deformační charakteristika ocelobetonového ostění

5 DISKUZE

Stanovení deformační charakteristiky ostění je postaveno na několika zjednodušujících předpokladech:

- známá deformační charakteristika horninového prostředí, která je v tomto případě vyjádřena lineární závislostí a je nezávislá na reakcích ostění,
- není vyhodnocován stav únosnosti ocelobetonového ostění v jednotlivých konstrukčních etapách; předpokládá se, že pro uvedené rozsahy přetvoření ostění (posuny u_i) nebude překročena jeho únosnost,
- použití 2D modelu.

Uvedené předpoklady jsou akceptovatelné. Pokud bude deformační charakteristika horninového prostředí známa, řešení se dále jen upřesní.

Vyhodnocení stavu únosnosti průřezu ostění je možné zahrnutím do řešení deformační charakteristiky ostění další vyhodnocovací proceduru, která bude sledovat čerpání únosnosti průřezu.

Řešení vazby horninové prostředí a ostění je v tomto případě pouze jednostranné, vliv přetváření ostění na vývoj deformační charakteristiky horninového prostředí není aplikován, protože doposud není dostatečně exaktně konstituován.

Použití 2D modelu není zcela objektivní. K objektivnímu zachycení přetváření horninového prostředí v oblastech předpolí výrubu a vlastního výrubu je objektivnější 3D model.

Přijatá zjednodušení nejsou v rozporu s principy deformačního chování horninového prostředí a ocelobetonového ostění. Skutečnost, že se oba procesy deformace vyvíjí paralelně od okamžiku provedení výrubu, eliminuje kontroverzní problém stanovení rozsahu počáteční deformace na nevyztuženém výrubu, před zahájením statické činnosti ostění. Úplné objektivní zachycení počátečních deformací v předpolí výrubu lze zohlednit aplikací 3D modelu.

6 ZÁVĚR

Deformační charakteristika konstrukce ocelobetonového ostění je obecně výsledkem součinnosti objektivních činitelů, daných horninovým prostředím, a subjektivních variabilních činitelů daných konstrukcí a procesem výstavby ostění.

Proměnlivá tuhost ocelobetonového ostění obecně a značná variabilita subjektivních činitelů, jako jsou: řízení procesu tvrdnutí betonu; příprava betonu o různých hodnotách modulu pružnosti; počet a mocnosti konstrukčních vrstev stříkaného betonu; časový posun mezi nástřikem jednotlivých vrstev; intenzita vyztužení vrstev stříkaného betonu podpěrnými ocelovými konstrukcemi, nabízí možnost pro optimalizaci návrhu řešení konstrukce ocelobetonového ostění s ohledem na zachování a čerpání stabilitního potenciálu horninového prostředí.

Uvedený příspěvek ve zkratce podává základní rozbor k problematice deformační charakteristiky ocelobetonového ostění, která není konstantní charakteristikou, ale je určována chováním horninového prostředí. Příspěvek ukazuje postup exaktního řešení této problematiky.

PODĚKOVÁNÍ

Článek byl realizován za finanční podpory projektu „Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO“, registrační číslo projektu: CZ.1.07/2.3.00/20.0013.

LITERATURA

- [1] HILAR, M. *Stříkaný beton v podzemním stavitelství*. Praha: ITA-AITES, 2008. ISBN 978-80254-1262-6.
- [2] BULYTCHEV, N. C. *Mechanika podzemnych sooruzenij*. (1982) Moskva: NEDRA, 270.
- [3] VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., STAŇKOVÁ, J. Určení přetvárných vlastností a stavu napětí v průřezu ocelobetonového ostění. *Tunel*. 2010, XIX. Nr. 4, pp 68-74. ISSN 1211-0728.
- [4] VOJTASÍK, K., HRUBEŠOVÁ, E., MOHYLA, M., STAŇKOVÁ, J. Závislost modulu pružnosti a přerozdělovacích napětíových koeficientů ocelobetonového průřezu na rozložení ocelových prvků v průřezu. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava Řada stavební*. 2011, XI. Nr. 1, pp 109-114. ISSN 1213-1962.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Richard Šňupárek, CSc., Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Ostrava.

Ing. Jiří Bošтік, Ph.D., Ústav geotechniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně.